



⑬ BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENTAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**
⑩ **DE 41 06 175 A 1**

⑤ Int. Cl.⁵:
H 04 N 3/02
H 04 N 5/225
H 04 N 7/18
// G01M 9/06, G01R
31/318, B60R 21/00

⑳ Aktenzeichen: P 41 06 175.6
㉔ Anmeldetag: 27. 2. 91
㉕ Offenlegungstag: 3. 9. 92

DE 41 06 175 A 1

㉑ Anmelder:
Zürl, Kurt, Dr., 8500 Nürnberg, DE

㉒ Vertreter:
Münich, W., Dipl.-Phys. Dr.rer.nat., Pat.-Anw.;
Steinmann, O., Dr., Rechtsanwalt., 8000 München

㉓ Erfinder:
Antrag auf Nichtnennung

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

㉔ Ultrahochgeschwindigkeitskamera mit extrem hoher Bildfrequenz

㉕ Sehr schnell ablaufende Vorgänge sollen zur Analyse beobachtet werden. Eine schnelle rechnergekoppelte Auswertung ohne lange und kostspielige Entwicklungsschritte ist anzustreben.
Vollelektronische bildgebende Kamera mit digitalem Bildspeicher und sehr hoher Zeitauflösung, welche durch die hochgradig parallele Verarbeitung der Bildinformation und Anwendung von integrierten Schaltkreisen erreicht wird. Das Bild wird mittels geordneter Lichtleitfasern in mehrere Teilbilder zerlegt, welche parallel verarbeitet werden. Eine Bildfrequenz von 10 MHz und mehr kann so realisiert werden.
Anwendbar für alle Bereiche der Hochgeschwindigkeitskameras, wie z. B. die Analyse von Crash-Tests bei Kraftfahrzeugen, Beobachtungen von Explosionsvorgängen usw.

DE 41 06 175 A 1

Beschreibung

Die Erfindung betrifft eine Ultrahochgeschwindigkeitskamera mit extrem hoher Bildfrequenz. Die Kamera kann als universelles Mittel zur Registrierung sehr schnell ablaufender Vorgänge angesehen werden. Dabei reicht ihr Einsatzgebiet durch alle Gebiete der Technik, sie ist aber auch vorteilhaft in der Biologie oder bei der Beobachtung des Ablaufs chemischer Vorgänge anwendbar. So ist zum Beispiel mit ihrer Hilfe eine genaue und detaillierte Verfolgung aller Arten von Explosionen möglich. Als Beispiel mag hier die Bewegung der Verbrennungsfront in einem Motor im Verhältnis zur Kolbenbewegung gelten. Ein weiteres wichtiges Anwendungsgebiet ist der Bereich der Strömungsmechanik, z. B. Beobachtungen im Windkanal. In diesem Zusammenhang muß auch auf die Möglichkeit der Verfolgung schnell ablaufender Vorgänge im nuklearen Bereich verwiesen werden.

Innerhalb der Fertigungstechnologie können als Untersuchungsobjekte Bestückungsautomaten angeführt werden, deren Echtzeitverhalten, das für eine exakte Arbeitsweise von großer Wichtigkeit ist, nur unter Zuhilfenahme extrem verlangsamerender Kameras verfolgt werden kann. Als weiteres Einsatzgebiet sind sog. Crash-Tests anzuführen, deren Durchführung Aufschluß über die Sicherheit von Kraftfahrzeugen geben soll.

Schließlich bietet die Erfindung noch die Möglichkeit des Aufbaus eines schnellen zweidimensionalen Logikanalysators, der z. B. bei einer Übertragung von zweidimensionalen Daten als Lichtfelder im Raum die Kontrolle der digitalen parallelen optischen Datenübertragung übernehmen könnte.

Zur Verfolgung schnell ablaufender Vorgänge in der Technik und der Naturwissenschaft stehen sog. Streak-Kameras unterschiedlicher Ausführungsformen zu Verfügung.

Eine elektronische Streak-Kamera, die z. B. mit Elektronenröhren aufgebaut ist, erzeugt ein im gewissen Sinne dimensionsloses Bild, das allein die Möglichkeit bietet, z. B. einen kurzen Laserimpuls hinsichtlich seines Intensitätsverlaufes über die Zeit zu verfolgen. Eine solche Kamera ist zwar wesentlich schneller als andere Kameras, besitzt aber selbst kein eigentliches bildgebendes System, sie kann nur Aussagen über ein Zeitverhalten liefern.

Bekannt sind auch Streak-Kameras mit mechanischem Aufbau. Die Aufzeichnung erfolgt auf einem Film, der z. B. über einen Drehspiegel belichtet wird. Nachteilig bei dieser Art Kamera ist die Notwendigkeit der Filmentwicklung. Hinzu kommt die Tatsache, daß nur jeweils ein sehr kurzer, durch die Umlaufgeschwindigkeit des Drehspiegels bedingter Zeitraum für die Betrachtung zur Verfügung steht. Gegenüber der elektronischen Variante bietet diese Kamera kaum Möglichkeiten der Triggerung, es ist nicht möglich, den Beginn der Abtastung an den Beginn oder eine bestimmte Phase eines ablaufenden Prozesses zu binden.

Nachteile anderer Art besitzen klassische Videokameras, die zwar durch Zusätze die Wahl extrem kurzer Verschußzeiten gestatten, aber zwischen den einzelnen Verschußzeiten sehr lange Zwischenzeiten für die Auslesung benötigen. Durch Anwendung technischer Kunstgriffe kann diesem Nachteil zwar in Grenzen begegnet werden, z. B. dadurch, daß man wiederholbare Ereignisse, deren Dynamik eine Untersuchung mit den obengenannten langen Zwischenräumen nicht erlaubt,

mit einer gewissen Zeitversetzung zur Belichtung mehrere Male hintereinander ablaufen läßt (Sampling), jedoch ist eine solche Maßnahme nur als ein Notbehelf zu betrachten.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, in einer Ultrahochgeschwindigkeitskamera eine hohe Empfindlichkeit bei einer schnellen Bildfolge, kombiniert mit einer elektronischen Auswertung, die eine schnelle Zurverfügungstellung des auszuwertenden Bildes gewährleistet, zu realisieren.

Die Lösung dieser Aufgabe gelingt mit einer Ultrahochgeschwindigkeitskamera erfindungsgemäß dadurch, daß in deren Bildebene eine aus den Enden eines Bündels von Lichtleitfasern mit einer beliebigen geometrischen Anordnung der Einzelfasern bestehende Eintrittsebene für einen Sensor vorgesehen ist, daß eine Zuordnung der anderen Faserenden zum jeweiligen geometrischen Ort der Einzelfaser in der Bildebene gegeben ist und daß die anderen Enden der Fasern auf jeweils einen optoelektronischen Empfänger gerichtet sind und Speichermittel mit hochgradig parallelen Zugriff zur Speicherung der Einzelsignale der Empfänger nach vorheriger A/D-Wandlung enthalten sind.

Die Form der Eintrittsebene kann durch die Wahl der Anordnung der Faserenden so gestaltet werden, daß sie eine optimale Anpassung an das jeweilige Meßproblem, d. h. an den zu beobachtenden Vorgang darstellt. Soll z. B. die Flugbahn eines sich geradlinig fortbewegenden Flugobjektes verfolgt werden, kann eine Anordnung gewählt werden, die aus einer zeilenförmigen Aneinanderreihung der Faserenden besteht.

Für das bereits genannte Anwendungsbeispiel, das die Beobachtung der Vorgänge in einem Verbrennungsmotor betrifft, müßte die Anordnung die Form eines Fensters besitzen, das einen Teil der Seitenwand der Verbrennungskammer des Motors einnimmt. Jede andere geometrische Form ist denk- und ausführbar.

Die gegenseitige Anordnung der Faserenden ist im Hinblick auf die Art des erwarteten Bildes ebenfalls frei wählbar. Soll ein Bild mit hoher Auflösung, aber nur für ein relativ kleines Bildfeld angestrebt werden, sind die Faserenden in der Eintrittsebene in der Form einer hexagonalen dichten Packung angeordnet. Ist eine hohe Auflösung nicht notwendig und soll ein relativ großes Bildfeld betrachtet werden, dann sind die Faserenden derart angeordnet, daß ihr Mittenabstand wesentlich größer als der Faserdurchmesser ist. Es wird in diesem Fall also ein relativ grobes Raster über einen größeren Bereich gelegt, eine Anordnung, wie sie z. B. für die Beobachtung eines Geschoßfluges zweckmäßig zu wählen wäre.

Am anderen Ende der Fasern ist deren Abstand in jedem Fall durch die Größe der Fotoempfänger vorgegeben. Die optoelektronischen Empfänger können als integrierte Schaltkreise ausgeführt sein, die außer dem Empfänger auch noch die nachfolgende Elektronik, z. B. einen Verstärker und A/D-Wandler enthalten.

Es besteht auch die Möglichkeit, einige oder eine größere Anzahl von Empfängerschaltungen auf einem gemeinsamen Schaltkreis zu vereinigen. Auch in diesem Fall können Mittel zur Ansteuerung der digitalen Speicher mittels der Empfängersignale, z. B. Adreßzähler vorgesehen werden.

Die Lichtempfänger können im Hinblick auf ihre spektrale Empfindlichkeit bereichsweise desensibilisiert werden. Das kann etwa durch eine geeignete Oberflächenvergütung oder durch eine Entspiegelung geschehen.

Jeder der optoelektronischen Empfänger unterliegt einer getakteten Betriebsweise, die eine Unterscheidung zwischen der Belichtungsphase und der Phase der Auslegung der Helligkeitsinformation unterscheiden zu können. Innerhalb jeder Taktperiode ist weiterhin die Durchführung eines internen Nullabgleiches vorgesehen, d. h. zwischen jede Empfangsphase ist eine Abgleichphase geschaltet. Die Eingangsschaltungen der integrierten Schaltkreise sind differentiell aufgebaut, um Drifterscheinungen einfach kompensieren zu können.

Zur zusätzlichen Belichtungszeitverkürzung können im optischen Strahlengang weitere belichtungszeitverkürzende Elemente, z. B. eine sog. multi-channel-plate vorgesehen werden, durch deren Anwendung Möglichkeiten der Belichtungszeitverkürzung um ca. 1 Zehnerpotenz genutzt werden können.

Die Kombination mehrerer oder aller vorgenannter Mittel und Maßnahmen ergibt einen getakteten Empfänger mit hoher Schnelligkeit und hoher Empfindlichkeit.

Die A/D-Wandlung der Signale findet mit der gleichen Taktfrequenz statt, wie sie für die Empfänger vorgesehen ist. Je nach Ausführung des Empfängers kann die A/D-Wandlung ein oder mehrere Bits tief sein. Falls die Graustufung tiefer sein soll, als beim A/D-Wandler vorgesehen, kann dies durch die Verarbeitung mehrerer aufeinanderfolgender Bilder, bei denen eine Referenzschwelle des A/D-Wandlers von Bild zu Bild variiert wird, zu einem Grautonbild erreicht werden. Hierbei geht die zeitliche Auflösung der Kamera zurück.

Die vorgesehenen Speichermittel sind digital und derart organisiert, daß hinter jedem Empfänger ein Teilspeicher mit großer Kapazität für jeweils ein Bildelement vorgesehen ist.

Von allen Teilspeichern muß gleichzeitig je ein Bildelement zugreifbar sein, das durch Ablegen in eine allen Teilspeichern gemeinsame Ebene gekennzeichnet ist. Da jeweils ein Bildelement aus jedem Teilspeicher gleichzeitig mit den zur gleichen Ebene gehörigen aus den anderen Teilspeichern abrufbar ist, repräsentieren alle gemeinsam ein Bild, das in dieser Ebene abgespeichert ist. Die Aufeinanderfolge der Speicherelemente stellen damit die zeitliche Aufeinanderfolge der Bilder dar. Die Auswertung der Bilder kann mit einem Rechner erfolgen.

Vorteilhafterweise ist eine Steuerschaltung vorgesehen, die eine ereignisabhängige Triggerung der Zeichnungsvorgänge ermöglicht. Damit kann sowohl der Beginn der Einzelbildabspeicherung, als auch die Zahl der abzuspeichernden Bilder je Bildfolge bestimmt werden. Wählbar ist ebenso der zeitliche Abstand der Einzelbilder innerhalb einer Bildfolge und der zeitliche Abstand einzelner Bildfolgen untereinander.

Das Wesen der Erfindung soll an einem in den Zeichnungen dargestellten Ausführungsbeispiel näher erläutert werden.

Die Fig. 1 zeigt den Gesamtaufbau eines Ausführungsbeispiels der Erfindung. Ein zu beobachtender Vorgang wird mit Hilfe des Objektives 1 auf die Eintrittsöffnung der Glasfasern (Bildebene) abgebildet. Diese Faserenden sind in einer geeigneten Halterung 2 gefaßt. Vor dem Objektiv 1 kann eine Multichannelplate 3 zur Bildverstärkung und als schneller elektronischer Verschluss angebracht werden. Es mögen p Faserenden, z. B. in einer quadratischen Anordnung, vorhanden sein. Somit ist eine Abbildung mit p Bildelementen (Pixeln) gegeben.

Der Strang mit p Fasern wird aufgeteilt in Fasergrup-

pen 4, 5 zu je m Fasern, welche jeweils auf einen integrierten Schaltkreis (IC) 6, 7 gerichtet sind. Es sind also $n = p/m$ Fasergruppen erforderlich. Die Aufteilung erfolgt derart, daß der geometrische Ort in der Eintrittsebene einer jeden Faser in jeder Fasergruppe bekannt ist und somit auch letztlich aus dem Speicher wieder eine zeitliche Abfolge einzelner Bilder rekonstruiert werden kann.

In jedem IC 6, 7 erfolgt eine Wandlung des Teilbildes (bestehend aus m Pixeln) zunächst in analoge elektrische Signale mit Hilfe von Fotodioden. Ggf. nach einer Aufbereitung des elektrischen Signals (Verstärkung) erfolgt eine Analog-Digital-Wandlung. Die Ausgangssignale dieser Wandler werden über Leitungen 8, 9 dem Bildspeicher 10 zugeführt.

Im einfachsten Fall wird nur 1 Bit gewandelt (Komparator), so daß letztlich lediglich ein binäres Bild (keine Grautöne) zur Verfügung steht. In dieser Konfiguration kann durch die Aufnahme mehrerer (zeitlich aufeinanderfolgender) Bilder mit unterschiedlichem Referenzpegel der Komparatoren ein Grautonbild erzeugt werden (bzw. vom Rechner zusammengesetzt werden). Die zeitliche Auflösung ist jedoch dann infolge von mehreren Einzelbelichtungen schlechter. Dieses Verfahren ist somit nur für geeignet "langsame" Vorgänge sinnvoll. Bei der hier genannten Konfiguration mit 1 Bit-Wandlung ($k = 1$) ist pro Pixel eine elektrische Verbindung erforderlich und entsprechend muß jeder Teilspeicher 12 einen m Bit breiten parallelen Zugriff ermöglichen.

Im allgemeinen ist — auch bei Hochgeschwindigkeitsanwendungen — ein Grautonbild erforderlich. Der A/D-Wandler ist dann z. B. als 4-Bit-Wandler ($k = 4$) ausgeführt (16 Graustufen). Für jedes Pixel ist dann ein 4 Bit breiter Speicher erforderlich; jeder Teilspeicher muß einen $k \cdot m$ Bit breiten Zugriff ermöglichen.

Fig. 2 zeigt die Details des ICs und des Teilspeichers. Jedes Faserende 15 wird mit einer geeigneten Abbildungsoptik 16 (eine Linse für ein IC oder Lenslet-Array) auf je eine Fotodiode 17 abgebildet. Damit der Empfang und die nachfolgende Aufbereitung des Signals 18 (Verstärkung, Kontrastüberhöhung mit Hilfe einer nichtlinearen Kennlinie usw.) durch Störgrößen wie z. B. Einstrahlungen, thermische Driften usw. möglichst wenig beeinflußt wird, kann der elektrische Signalzug symmetrisch ausgeführt sein, d. h. daß z. B. jeweils eine zweite, lichtabgeschirmte Fotodiode existiert und die Elektronik differentiell ausgeführt ist. Somit wird die Differenz der beiden Diodensignale verarbeitet und Störungen weitgehend kompensiert. Die Anzahl der Pixel pro IC 19 wird u. a. durch die Auflösung des A/D-Wandlers 20 beschränkt, da pro Bit ein elektrischer Anschluß (Pin) des ICs erforderlich ist. Ein multiplexen ist i. a. nicht möglich oder sinnvoll, wenn eine hohe Bildfrequenz (z. B. 10 MHz) erreicht werden soll. Im IC sind Schaltungsteile 21 zur Ansteuerung der A/D-Wandler, ggf. für automatischen Nullabgleich der Eingangsverstärker, Adreßzähler zur Ansteuerung der Teilspeicher sowie Steuereingänge für eine Triggerlogik 11 vorgesehen.

Der Bildspeicher besteht aus n Teilspeichern 12. Jeder dieser Teilspeicher besteht wiederum aus $k \cdot m$ Speichergruppen, wobei jedem Pixel eine Speichergruppe 15 zugeordnet ist. Die Tiefe dieser Speichergruppen bestimmt die Anzahl der Bilder, die das System speichern kann.

Bei 10 MHz Bildfrequenz, 128×128 Pixeln und einer 4 Bit A/D-Wandlung wird für eine Bildfolge von 10 ms (100 000 Bilder) ein Bildspeicher mit einer Kapazität von insgesamt $128 \times 128 \times 100\,000 \times 4 \text{ Bit} = 781,25 \text{ MByte}$

benötigt. Dieser Speicher muß einen parallelen 100ns-Zugriff auf 8 KByte ermöglichen. Um dies zu erreichen, muß das System z. B. in 256 ICs zu je 64 Pixeln mit nachfolgendem Teilspeicher aufgeteilt werden. Jeder Teilspeicher muß dann einen 32 Byte breiten Zugriff ermöglichen.

Sämtliche Teilspeicher sind über einen Speicher-Bus 13 mit einem Interface 14 verbunden, welches der Zugriff eines (in den Zeichnungen nicht dargestellten) Rechners auf den Bildspeicher ermöglicht.

Patentansprüche

1. Ultrahochgeschwindigkeitskamera, mit extrem hoher Bildfrequenz, dadurch gekennzeichnet, daß in der Bildebene eine aus den Enden eines Bündels von Lichtleitfasern mit einer beliebigen geometrischen Anordnung der Einzelfaser bestehenden Eintrittsebene für einen Sensor vorgesehen ist, daß eine Zuordnung der anderen Faserenden zum jeweiligen geometrischen Ort der Einzelfaser in der Bildebene gegeben ist und daß die anderen Enden der Fasern auf jeweils einen optoelektronischen Empfänger gerichtet sind und Speichermittel mit hochgradig parallelen Zugriff zur Speicherung der Einzelsignale der Empfänger nach vorheriger A/D-Wandlung enthalten sind.
2. Ultrahochgeschwindigkeitskameras nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Enden der Lichtleitfasern in der Eintrittsebene eine Zeile bilden.
3. Ultrahochgeschwindigkeitskameras nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Enden der Lichtleitfasern in der Eintrittsebene eine zweidimensionale Matrix bilden.
4. Ultrahochgeschwindigkeitskameras nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Enden der Lichtleitfasern in der Eintrittsebene eine geometrische Fläche bedecken, die einem speziellen Meßproblem angepaßt ist.
5. Ultrahochgeschwindigkeitskamera nach den Ansprüchen 3 und 4, dadurch gekennzeichnet, daß die Enden der Lichtleitfasern hexagonal dicht gepackt sind.
6. Ultrahochgeschwindigkeitskamera nach den Ansprüchen 2 und 3, dadurch gekennzeichnet, daß der Abstand der Enden der Lichtleitfasern untereinander wesentlich größer ist als ihr Durchmesser.
7. Ultrahochgeschwindigkeitskamera nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der optoelektronische Empfänger auf einem integrierten Schaltkreis untergebracht ist.
8. Ultrahochgeschwindigkeitskamera nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß der integrierte Schaltkreis außer dem optoelektronischen Empfänger auch nachfolgende Elektronik (Verstärker, A/D-Wandler etc.) enthält.
9. Ultrahochgeschwindigkeitskamera nach den Ansprüchen 7 und 8, dadurch gekennzeichnet, daß mehrere optoelektronische Empfänger auf einem gemeinsamen Schaltkreis vereinigt sind.
10. Ultrahochgeschwindigkeitskamera nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß die Elektronik Mittel zur Ansteuerung der digitalen Speicher enthält.
11. Ultrahochgeschwindigkeitskamera nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß Mittel zur spektral bereichsweisen Desensibilisierung der op-

toelektronischen Empfänger vorgesehen sind.

12. Ultrahochgeschwindigkeitskamera nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, daß die Mittel zur Desensibilisierung aus einer Oberflächenvergütung bestehen.

13. Ultrahochgeschwindigkeitskamera nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, daß die Mittel zur Desensibilisierung aus einer Entspiegelung der Oberfläche bestehen.

14. Ultrahochgeschwindigkeitskamera nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß zur Unterscheidung zwischen der Belichtungszeit und Auslesung der Helligkeitsinformation jeder optoelektronische Empfänger getaktet ist.

15. Ultrahochgeschwindigkeitskamera nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, daß Mittel zum internen Nullabgleich innerhalb jeder Taktperiode vorgesehen sind.

16. Ultrahochgeschwindigkeitskamera nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß zur Kompensation von Drifterscheinungen die Eingangsschaltungen der integrierten Schaltkreise symmetrisch und/oder differentiell aufgebaut sind.

17. Ultrahochgeschwindigkeitskamera nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, daß den A/D-Wandlern die gleiche Taktfrequenz wie den optoelektronischen Empfängern aufgeprägt ist.

18. Ultrahochgeschwindigkeitskamera nach Anspruch 17, dadurch gekennzeichnet, daß für die Abspeicherung binärer Bilder die maximale Taktfrequenz gewählt ist.

19. Ultrahochgeschwindigkeitskamera nach Anspruch 17, dadurch gekennzeichnet, daß für die Abspeicherung von Bildern mit Grautonauflösung eine niedrige Taktfrequenz gewählt wird.

20. Ultrahochgeschwindigkeitskamera nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Speichermittel aus Digitalspeichern bestehen.

21. Ultrahochgeschwindigkeitskamera nach Anspruch 20, dadurch gekennzeichnet, daß jedem Empfänger ein Teilspeicher hoher Kapazität zugeordnet ist.

22. Ultrahochgeschwindigkeitskamera nach Anspruch 20, dadurch gekennzeichnet, daß Mittel für den gleichzeitigen Zugriff zu den Speicherinhalten einer allen Teilspeichern gemeinsamen Speicherebene vorgesehen sind.

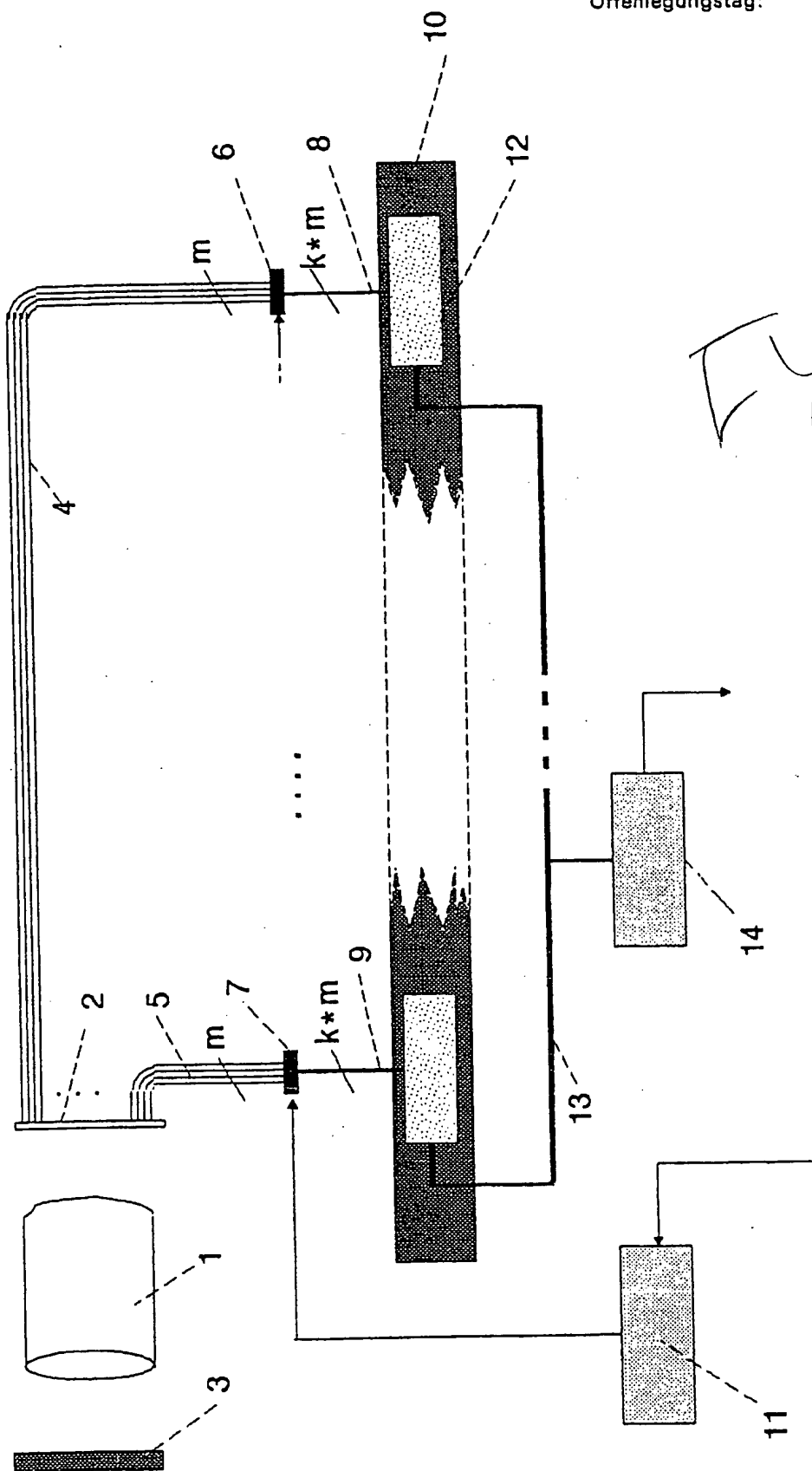
23. Ultrahochgeschwindigkeitskamera nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß Mittel zur ereignisabhängigen Triggerung der Bildabspeicherung vorgesehen sind.

24. Ultrahochgeschwindigkeitskamera nach Anspruch 23, dadurch gekennzeichnet, daß mehrere unterscheidbare Triggereingänge vorgesehen sind.

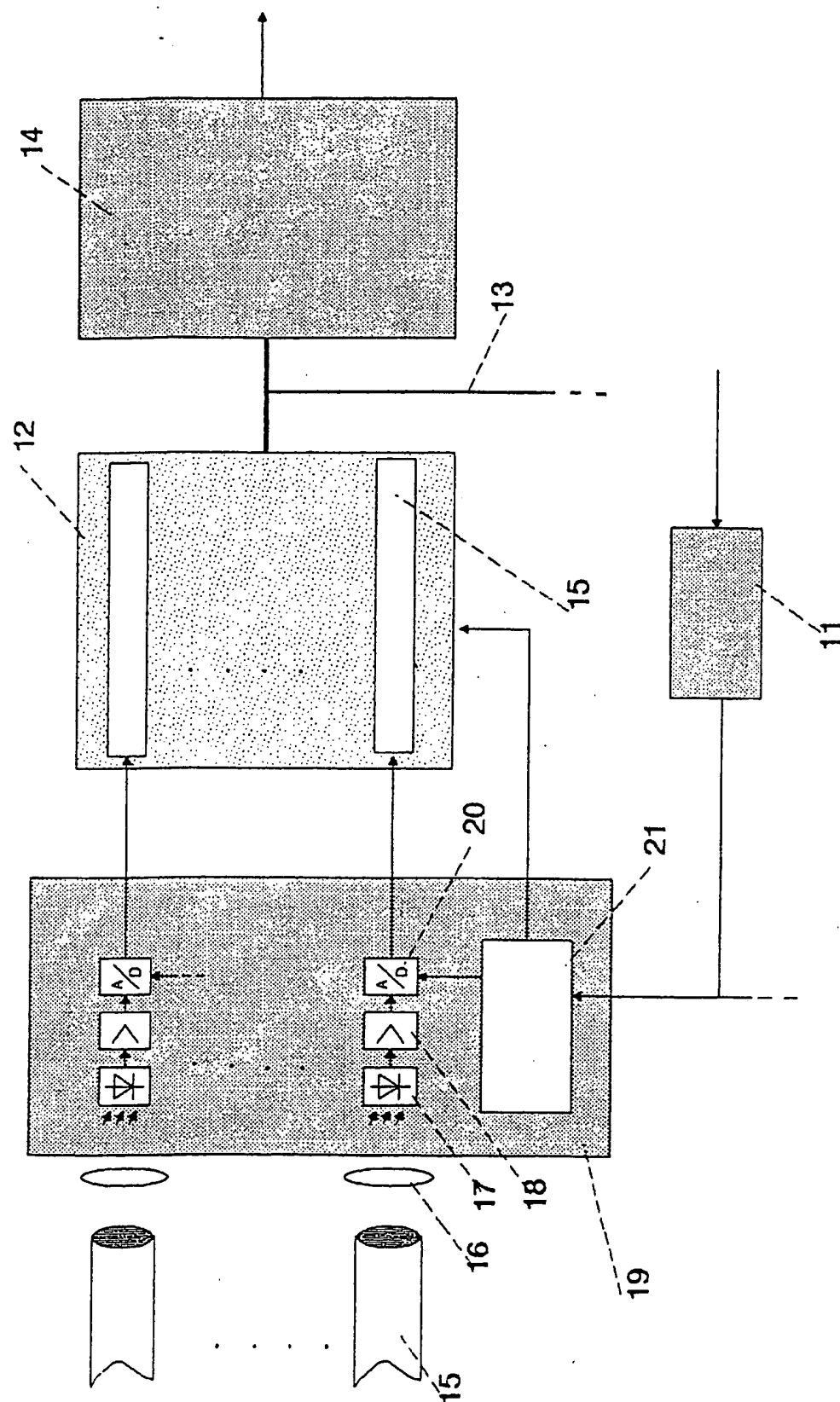
25. Ultrahochgeschwindigkeitskamera nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß im optischen Strahlengang zur Erreichung gegenüber der Hochgeschwindigkeitskamera verkürzter Belichtungszeiten ein sehr schneller elektronischer Verschuß vorgesehen ist.

26. Ultrahochgeschwindigkeitskamera nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß im optischen Strahlengang Mittel zur Bildverstärkung vorgesehen sind.

Hierzu 2 Seite(n) Zeichnungen



Figur 1



Handwritten signature or mark.

Figur 2

(51) Int.Cl.⁵:
H 04 N 3/02
H 04 N 5/225
H 04 N 7/18
//G01 M 9/06, G01R
31/318, B60R 21/00

(19) **Federal Republic of Germany**
[emblem]
German Patent Office

(12) **Offenlegungsschrift**
(Published Patent Application)

(10) **DE 41 06 175 A1**

(21) Application number: P 41 06 175.6

(22) Application date: February 27, 1991

(43) Disclosure date: September 3, 1992

(71) Applicant:
Zürl, Kurt, Dr., 8500 Nurnberg, DE

(74) Representative:
Münich, W., Dipl. Phys., Dr. rer. nat., Patent Attorney;
Steinmann, O., Dr., Attorney-at-Law, 8000 Munich

(72) Inventor: Request for the inventor's name to be omitted

Request for examination has been filed pursuant to § 44 of the German Patent Act.

(54) Title: Ultra High Speed Camera with Extremely High Frame Rate

(57) Very fast successive events are to be observed for analysis. The goal is a fast computer-coupled analysis without long and expensive development steps.

All electronic imaging camera with digital frame memory and very high time resolution, which is achieved through intense parallel processing of the image information and use of integrated circuits. The image is sliced by means of coherent optical fibers into several partial images, which are processed in parallel. A frame rate of 10 MHz and higher can be realized in this manner.

Applicable to all areas of high speed cameras, such as the analysis of crash tests for motor vehicles, observations of explosion processes, etc.

DE 41 06 175 A1

Specification

The invention relates to an ultra high speed camera with extremely high frame rate. The camera can be regarded as a general means for recording very fast successive events. In this respect its field of application covers all areas of technology, but it can also be used advantageously in biology or in the observation of the course of chemical processes. Thus, for example, the use of such a camera makes it possible to track exactly and in detail all types of explosions. One example is the movement of the combustion front in a motor in relation to the piston movement. Another important application is in the area of flow mechanics, e.g. the observations in the wind channel. In this respect reference must also be made to the possibility of tracking fast successive events in the nuclear field.

In production technology an example of an object of analysis is automatic insertion equipment, where the real time behavior, which is very important for an exact mode of operation, can be tracked only with the assistance of time extension cameras. Another area of application is the so-called crash test, which is conducted to obtain information about the safety of motor vehicles.

Finally the invention offers also the possibility of constructing a fast two dimensional state analyzer, which in the transfer of two dimensional data as fields of light in space could take over the control of the digital parallel optical data transfer.

To track fast successive events in technology and natural science, there are so-called streak cameras of varying designs.

An electronic streak camera, which is constructed, for example, with electronic tubes, produces an image that is dimensionless in a sense and which alone offers the possibility of tracking, e.g., a short laser pulse with respect to its intensity curve over time. Of course, such a camera is significantly faster than other cameras, but it itself does not have any real imaging system; it can supply only information about a time response.

Known are also streak cameras of mechanical design. The recording is done on a film, which is exposed, for example, by means of a rotating mirror. The drawback of this kind of camera is the need to develop the film. In addition, there is the fact that only a very short period of time is available for observation due to the cycle rate of the rotating mirror. Compared to the electronic variant, this camera offers hardly any possibility of triggering; it is not possible to tie the beginning of the scanning operation to the beginning or a specific phase of a sequential process.

Drawbacks of a different kind are exhibited by classical video cameras that do permit the selection of extremely short exposure periods with additional equipment, but need very long interim periods for the readout between the individual exposure periods. With the use of engineering tricks this drawback can, of course, be overcome within certain limits, for example, by having repeatable events, the dynamics of which do not permit an analysis with the aforementioned long intervals, run several times in succession (sampling) with some staggering of time for exposure. Nevertheless, such a measure must be regarded only as an improvisation.

The invention is based on the problem of realizing in an ultra high speed camera high sensitivity to a high speed sequence of images, combined with an electronic analysis, which guarantees fast availability of the image to be analyzed.

The invention solves this problem with an ultra high speed camera in that its image plane exhibits an entrance plane, which comprises the ends of a bundle of light conducting fibers with an arbitrary geometric arrangement of the individual fibers and which is intended for a sensor, that the other fiber ends are assigned to the respective geometric locus of the individual fibers in the image plane, and that the other ends of the fibers are aligned with a respective optoelectronic receiver, and that there are storage means with intense parallel access for storing the individual signals of the receivers after previous analog to digital conversion [A/D conversion].

The shape of the entrance plane can be configured in such a manner with the selection of the arrangement of the fiber ends that said shape constitutes an optimal adaptation to the respective measurement problem that is to the event to be observed. Should, for example, the path of trajectory of a flying object, which continues to travel in a straight line, be tracked, one can select an arrangement that consists of the fiber ends being arranged end to end in a line.

For the aforementioned exemplifying application that relates to observing events in an internal combustion motor, the arrangement must exhibit the shape of a window that occupies a part of the side wall of the combustion chamber of the engine. Any other geometric shape is conceivable and feasible.

The reciprocal arrangement of the fiber ends can also be selected randomly with respect to the expected image. Should the goal be an image with high resolution, but only for a relatively small image field, the fiber ends in the entrance plane are arranged in the shape of a hexagonal close package. If high resolution is not necessary and should a relatively large image field be observed, then the fiber ends are arranged in such a manner that the center to center distance of

adjacent fibers is significantly longer than the diameter of the fibers. Thus, in this case a relatively coarse grid is laid over a larger area, as would be expedient to select, for example, for the purpose of observing the flight of a projectile.

At the other end of the fibers, their spacing is specified in every case by the size of the photo receiver. The optoelectronic receivers can be designed as integrated circuits, which contain not only the receiver but also the following electronics, e.g. an amplifier and an A/D converter.

There is also the option of combining some or a larger number of receiver circuits to form one common circuit. In this case, too, means can be provided for actuating the digital memory by means of receiver signals, e.g. address counters.

The light receivers can be desensitized area-by-area with respect to their spectral sensitivity. This can be done, for example, by a suitable surface coating or by an anti-reflection coating.

Each of the optoelectronic receivers is subject to a clocked operating mode that can differentiate between the exposure phase and the interpretation phase of the brightness information. Furthermore, it is expected that an internal zero balancing will be carried out in each clock cycle; that is, a balancing phase will be actuated between each receiving phase. The input circuits of the integrated circuits are constructed differentially in order to compensate readily for drift phenomena.

To further decrease the exposure time, the optical path can have additional elements that decrease the exposure time, for example, a so-called multi-channel plate. With the use of such a multi-channel plate it is possible to decrease the exposure time by approximately 1 power of ten.

The combination of several or all of the aforementioned means and measures yields a clocked receiver with high speed and high sensitivity.

The A/D conversion of the signals takes place at the same clock rate, as is provided for the receivers. Depending on the design of the receiver, the A/D conversion can be one or more bits low. If the gray scale is to be lower than provided for A/D conversion, it can be achieved by processing successive images, where a reference threshold of the A/D converter is varied from image to image to produce a gray scale image. In so doing, the time resolution of the camera decreases.

The provided memory mediums are digital and are organized in such a manner that behind each receiver there is a partial storage with large capacity for one picture element.

From each of the partial storages one must be able to access simultaneously one picture element that is characterized by its storage in a plane that is common to all partial storages. Since one picture element can be fetched from each partial storage simultaneously with those belonging to the same plane from the other partial storages, they altogether represent an image that is stored in this plane. Thus, the succession of storage elements represents the chronological sequence of images. The images can be analyzed with a computer.

There is advantageously a control circuit that enables an event-dependent triggering of the recording processes. Thus, both the beginning of the storage of single images and the number of images to be stored can be determined for each sequence of images. The time interval between the individual images in a sequence of images and the time interval between the individual sequences of images can also be selected.

The essence of the invention shall be explained in detail with one embodiment shown in the drawings.

Figure 1 shows the entire system of an embodiment exemplifying the invention. An event to be observed is imaged by means of the lens 1 on the entrance aperture of the glass fibers (image plane). These fiber ends are held in a suitable holder 2. A multi-channel plate 3 for image intensification and as a fast electronic shutter can be mounted in front of the lens 1. There may be p fiber ends, e.g. in a square arrangement. In this manner the conditions for imaging with p picture elements (pixels) are fulfilled.

The strand with p fibers is divided up into groups of fibers 4, 5 with m fibers, each of which are aligned with one integrated circuit (IC) 6, 7 respectively. Thus, $n = p/m$ groups of fibers are required. The division is done in such a manner that the geometric locus in the entrance plane of each fiber in each group of fibers is known; and, thus, also in the final end a chronological sequence of individual images can be reconstructed.

In each IC 6, 7 the partial image (consisting of m pixels) is first converted into analog electric signals by means of photodiodes. If desired, the processing of the electric signal (amplification) may be followed by an analog to digital conversion. The output signals of these converters are fed over lines 8, 9 to the frame memory 10.

In the simplest case only 1 bit is converted (comparator), so that in the final end only one binary image (no gray scales) is available. In this configuration a gray scale image can be produced by recording several (chronologically sequential) images with varying reference levels of the comparators (or can be assembled by the computer). However, the time resolution is worse as a consequence of the several individual exposures. Thus, this method is significant only for suitably "slow" events. In the configuration mentioned here with 1 bit conversion ($k = 1$), it is necessary to connect each pixel electrically; and correspondingly each partial storage 12 must enable an m bit wide parallel access.

In general a gray scale image is required -- also for high speed applications. The A/D converter is then designed, for example, as a 4 bit converter ($k = 4$) (16 levels of gray). For each pixel then a 4 bit wide storage is necessary; each partial storage must enable a $k \times m$ bit wide access.

Figure 2 shows the details of the IC and the partial storage; each fiber end 15 is imaged with suitable image-forming optics 16 (one lens for one IC or lenslet array) on each photodiode 17. So that the reception and the subsequent processing of the signal 18 (amplification, increased contrast by means of a nonlinear characteristic, etc.) is affected as little as possible by disturbance variables, such as stray effects, thermal drifts, etc., the electric signal train can be designed symmetrically, i.e. that, for example, a second, light-shielded photodiode exists and the electronics is designed differentially. In this manner the difference of the two diode signals is processed and the disturbances are largely compensated. The number of pixels per IC 19 is limited, among other things, by the resolution of the A/D converter 20, since an electric connection (pin) of the IC is required for each bit. As a rule, multiplexing is not possible or logical, if the goal is a high frame rate (e.g. 10 MHz). The IC exhibits circuit parts 21 for actuating the A/D converters, optionally for automatic zero balancing of the input amplifiers, address counters for actuating the partial storages as well as control inputs for a trigger logic 11.

The frame memory consists of n partial storages 12. Each of these partial storages consists in turn of $k \times m$ storage groups, where one storage group 15 is assigned to each pixel. The depth of these storage groups determines the number of images that the system can store.

At a 10 MHz frame rate, 128×128 pixels and a 4 bit A/D conversion, one sequence of images of 10 ms (100,000 images) needs a frame memory with a capacity of altogether $128 \times 128 \times 100,000 \times 4$ bits = 781.25 Mbytes. This storage must enable a parallel 100 ns access to 8 Kbytes. To reach this goal, the system must be divided up, for example, into 256 ICs at 64 pixels each with a subsequent partial storage. Each partial storage must then enable a 32 byte wide

access.

All partial storages are connected by means of a storage bus 13 to an interface 14, which enables the access of a computer (not illustrated in the drawings) to the frame memory.

Patent Claims:

1. Ultra high speed camera with extremely high frame rate, characterized in that the image plane exhibits an entrance plane, which comprises the ends of a bundle of light conducting fibers with an arbitrary geometric arrangement of the individual fibers and which is intended for a sensor, that the other fiber ends are assigned to the respective geometric locus of the individual fibers in the image plane, and that the other ends of the fibers are aligned with a respective optoelectronic receiver, and that there are storage means with intense parallel access for storing the individual signals of the receivers after previous analog to digital conversion [A/D conversion].
2. Ultra high speed camera, as claimed in claim 1, characterized in that the ends of the light conducting fibers in the entrance plane form a line.
3. Ultra high speed camera, as claimed in claim 1, characterized in that the ends of the light conducting fibers in the entrance plane form a two dimensional matrix.
4. Ultra high speed camera, as claimed in claim 1, characterized in that the ends of the light conducting fibers in the entrance plane cover a geometric area that is adapted to a specific measurement problem.
5. Ultra high speed camera, as claimed in claims 3 and 4, characterized in that the ends of the light conducting fibers are hexagonal close packed.
6. Ultra high speed camera, as claimed in claims 2 and 3, characterized in that the distance between the ends of the light conducting fibers is larger than their diameter.
7. Ultra high speed camera, as claimed in claim 1, characterized in that the optoelectronic receiver is included in an integrated circuit.
8. Ultra high speed camera, as claimed in claim 7, characterized in that the integrated circuit contains not only the optoelectronic receiver but also the following electronics (amplifier, A/D

converter, etc.).

9. Ultra high speed camera, as claimed in claims 7 and 8, characterized in that several optoelectronic receivers are combined on a common circuit.
10. Ultra high speed camera, as claimed in claim 8, characterized in that the electronics contains means to actuate the digital memory.
11. Ultra high speed camera, as claimed in claim 1, characterized by means for desensitizing the optoelectronic receivers over areas of the spectrum.
12. Ultra high speed camera, as claimed in claim 11, characterized in that the means for desensitization consist of a surface coating.
13. Ultra high speed camera, as claimed in claim 11, characterized in that the means for desensitization consist of an anti-reflection coating of the surface.
14. Ultra high speed camera, as claimed in claim 7, characterized in that to distinguish between the exposure time and the readout of the brightness information each optoelectronic receiver is clocked.
15. Ultra high speed camera, as claimed in claim 14, characterized by means for internal zero balancing in each clock cycle.
16. Ultra high speed camera, as claimed in claim 7, characterized in that to compensate for drift phenomena the input circuits of the integrated circuits are constructed symmetrically and / or differentially.
17. Ultra high speed camera, as claimed in claim 14, characterized in that the A/D converters are characterized by the same clock rate as the optoelectronic receivers.
18. Ultra high speed camera, as claimed in claim 17, characterized in that the maximum clock rate is selected for storing binary images.
19. Ultra high speed camera, as claimed in claim 17, characterized in that a low clock rate is selected for storing images with gray scale resolution.

20. Ultra high speed camera, as claimed in claim 1, characterized in that the storage means consists of digital memories.
21. Ultra high speed camera, as claimed in claim 20, characterized in that a partial storage of high capacity is assigned to each receiver.
22. Ultra high speed camera, as claimed in claim 20, characterized by means for simultaneous access to the memory content of a storage plane that is common to all partial storages.
23. Ultra high speed camera, as claimed in claim 1, characterized by means for event-dependent triggering the storing of images.
24. Ultra high speed camera, as claimed in claim 23, characterized by several distinguishable trigger inputs.
25. Ultra high speed camera, as claimed in claim 1, characterized in that a very fast electronic shutter is provided in the optical path to achieve shorter exposure periods in the high speed camera.
26. Ultra high speed camera, as claimed in claim 1, characterized in that the optical path has means for image intensification.

DE 41 06 175 A1

DRAWINGS PAGE 1

Number:	DE 41 06 175 A1
Int. Cl. ⁵ :	H 04 N 3 / 02
Disclosure date:	September 3, 1992

Figure 1
[see drawing]

DE 41 06 175 A1

DRAWINGS PAGE 2

Number:	DE 41 06 175 A1
Int. Cl. ⁵ :	H 04 N 3 / 02
Disclosure date:	September 3, 1992

Figure 2
[see drawing]

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ BLACK BORDERS
- ☐ IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- ☐ FADED TEXT OR DRAWING
- ☐ BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING
- ☐ SKEWED/SLANTED IMAGES
- ☐ COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS
- ☐ GRAY SCALE DOCUMENTS
- ☒ LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT
- ☐ REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY
- ☐ OTHER: _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.